# Двигатели постоянного тока

## Обзор

История определяет важную роль играемую двигателями постоянного тока в развитии промышленных энергосистем. Машины постоянного тока были первым устройствами для преобразования электрической энергии в механическую и наоборот в режиме генератора. Безусловно, эффективные оперативные характеристики, гибкие свойства и высокая эффективность способствует широкому распространению двигателей постоянного тока во многих отраслях промышленности.

Последние разработки недорогих асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и позже электронным частотным управлением были вытеснены двигателями постоянного тока в некоторой мере, особенно в диапазоне низкой активной мощности. Однако при этом, преимущества стабильности и сравнительно простое управление машины переменного тока неоспоримы. В своей наиболее эффективной форме, скорость пропорциональна напряжению на якоре(ротор), момент – току на якоре и отношение один к одному между начальным крутящим моментом и стартовым(пусковым) током.

Современные двигатели постоянного тока под управлением тиристоров и со сложной защитой по прежнему обеспечивают хорошую производительность промышленного регулируемого привода. Высокопроизводительные испытательные установки и высокомощные двигатели для полиграфической и бумажной индустрии, высокоскоростных пассажирских лифтов и объектов управления с высокой мгновенной нагрузкой в металлообрабатывающей промышленности и производстве пластмасс; все вероятнее всего продолжат использование двигателя постоянного тока с тиристорным управлением в течении значительного времени, особенно в ремонтных программах, где так же есть двигатели постоянного тока. Задача стоящая перед приводом постоянного тока, полностью вытеснить конкурента - DC-двигатель, является трудноразрешимой.

DC – станки и серво двигатели главным образом основанные на преобразовательных технологиях продолжают предлагать высокую производительность при низких ценах в пределах мощности 5kW, но и здесь AC технология достигает значительных успехов.

Внедрение и развитие электронных приводы с переменной скоростью продолжает стимулировать интенсивное развитие двигателей как постоянного тока, так и переменного. Возможности производительности обоих расширяются как результат, и двигатель постоянного тока вероятно найдет специализированное применение в недалеком будущем.

Большинство стандартных двигателей постоянного тока, как с обмоткой возбуждения, так и с постоянными магнитами, теперь разрабатываются специально что бы использовать преимущества выпрямителей источников питания переменного тока. Площадь полностью покрытой рамочной конструкции позволяет минимизировать высоту центрального вала для заданной номинальной мощности и позволяет снизить магнитные потери, что в свою очередь повышает коммутативную способность.

За последние несколько лет использование двигателей с постоянными магнитами, как правило мощностей кратных долей от 3kW, стало повсеместным в приводах общего назначения. В такой конструкции постоянные магниты встроенные(запрессованные) в раму двигателя заменяют обычно применяемую обмотку возбуждения. Магниты имеют изогнутую поверхность для постоянного воздушного зазора с якорем.

## Основные уравнения и исполнение

### Электродвигатель с обмоткой возбуждения

На схеме DC двигателя с шунтовой(параллельной) обмоткой, Рисунок 1.1, изображен якорь, сопротивление якоря(Ra) и обмотка возбуждения. Напряжение питания якоря Va подается, как правило, от тиристорной системы управления, а питание обмотки возбуждения Vf от отдельного мостового выпрямителя.

Когда якорь вращается в ЭДС Ea индуцируется в цепи якоря и называется противо ЭДС, так как она выступает против приложенного напряжения Va и потока вызванного Va. Это противоЭДС Ea связанная со скоростью якоря и главного потока поля.

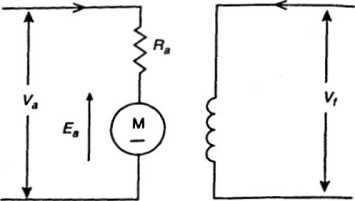


Рисунок Двигатель постоянного тока с шунтовой(параллельной) обмоткой

(1.1)

где n – скорость вращения, – поток поля и k1 – константа двигателя.

Так же приложенное или напряжение на якоре Va вычисляется по формуле:

(1.2)

где Va – приложенное напряжение на якоре, Ia = ток якоря и Ra сопротивление якоря.

Умножим выражение 1.2 на Ia:

(1.3)

общая мощность = мощность на выходе + потери на якоре.

Взаимодействие потока поля и потока якоря создает крутящий момент якоря. Таким образом:

(1.4)

где k2 – константа, If – ток поля и, Ia – ток якоря.

Это подтверждает простые и линейны характеристики двигателя постоянного тока и рассмотрение этих простых уравнений показывает управляемость и стабильность.

Скоростная характеристика двигателя как правило представлены графиками скорости от входного тока или момента и его форма может быть получена из уравнений 1.1 и 1.2:

Если поток поддерживается постоянным, что достигается за счет удержания тока поля постоянным, в компенсированном(асинхронном) двигателе, то:

Схемы электродвигателей постонного тока с параллельной и последовательной обмоткой изображены на рисунках 1.1 и 1.2.

В двигателе с шунтовой обмоткой поток электрического поля незначительно изменяется от тока якоря, а значение при максимальной нагрузке редко превышает 5% от Va,что видно из графика на рисунке 1.3, где скорость остается практически постоянной на большом диапазоне моментов нагрузки.

График двигателя с последовательным включением обмотки, Рисунок 1.4, показывает начальное увеличение потока пропорционально току, и падение вследствие магнитного насыщения. Кроме того, цепь якоря включает в себя сопротивление обмотки возбуждения, и скорость становится приблизительно обратна пропорционально току. Если нагрузка падает, скорость резко возрастает, что может быть опасно: обычно последовательный двигатель не должен использоваться там, где есть возможность потери нагрузки, но он имеет высокие значения крутящего момента при низкой скорости и его характеристика падения скорости с увеличением нагрузки полезна в приложениях, таких как тяговые и подъемники или некоторые смесители где статическое трение является преобладающим.

Электродвигатель постоянного тока смешанного возбуждения сочетает в себе характеристики как параллельного, так и последовательного включения; его график изображен на Рисунке 1.5

Точная форма характеристики крутящего момента/скорости определяется значениями сопротивления параллельного и последовательного полей. Немного снижающаяся характеристика на Рисунке 1.6 имеет преимущества во многих приложениях снижения механических воздействий при внезапной нагрузке.

При управлении полупроводниковым преобразователем с обратной связью по скорости с использованием тахогенератора, форма зависимости скорость-нагрузка в значительной степени определяется контроллером. Это стало стандартом использования обычного шунтового DC двигателя для снижения цены, даже если зависимость скорость-нагрузка в разомкнутой системе управления немного повышается.

### Двигатели с постоянными магнитами

По сравнению со стандартными видами двигателей с обмоткой возбуждения, обычно применяемый(обычный, простейший) серво-двигатель с постоянными магнитами зачастую спроектированны на хорошие характеристики пульсации крутящего момента на низких скоростях. Однако, высокоскоростная характеристика этого двигателя не идеальна для всех приложений. Из-за механических и электрических ограничений коллектора двигателя увеличение скорости вращения с сохраняющейся нагрузкой приводит к пределу коммутации двигателя. На практике каждый двигатель предназначен для работы в безопасной зоне коммутации, где возможный крутящий момент двигателя снижается по мере увеличения скорости вращения двигателя как в шунтовом двигателе, Рисунок 1.3.

График зависимости момента от скорости для обычного PM DC двигателя показан на Рисунке 1.7. Область с непрерывной работой может быть определена как область, где двигатель может работать 24 часа со 100% загрузкой и приемлемым повышением температуры.

Характеристики параметров периодической работы двигателя определяют область работы доступной для попеременного ускорения и замедления. Этот аспект обсуждается в секции рабочих циклов(27-28 стр.). Предел коммутации становится очевидно превышен если щетки начинают чрезмерно искриться. Сильная перегрузка в этом диапазоне вызовет сильное искрение на всей окружности коллектора. Это явление известноt как искрение щеток или дуговой разряд на коллекторе стоит избегать, так как он повреждает как коллектор, так и щеточный механизм, значительно уменьшая срок службы двигателя. К счастью, электронный контроллер питания двигателя можно легко настроить таким образом, что бы предотвратить перегрузку.

Хорошее соединение – способность обеспечивать разворот ток якоря без излишнего искрения на щетках – имеет особое значение. Следует отметить, что хотя наличие искрения является индикатором плохого соединения, его оптимизация требует значительных навыков. Безразличие к качеству соединения показывает невыгодность DC двигателей по сравнению с асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором в плане технического обслуживания и цены. Все больше времени уделяется на сокращение времени производства и увеличение надежности привода, в то же время сокращение времени на техническое обслуживание являются факторами в пользу двигателей переменного тока.

## Принцип работы

В двигателе постоянного тока с независимой параллельной обмоткой возбуждения постоянное напряжение подается на обмотки и результирующий ток создает магнитный поток в статоре, основные полюса поля, роторе и воздушном зазоре, Рисунок 1.8а. Напряженость поля определяется током обмотки возбуждения. Обмотка якоря занимает ротор катушками по периметру, противоположные катушки соеденены друг с другом и к сегменту коллектора. Щетки обеспечивают подачу тока к вращающемуся якорю. Этот ток генерирует поток якоря, Рисунок 1.8б, с магнитными осями зафиксированными под углом равным 90° к потоку.

Взаимодействие этих двух магнитных потоков создают искажения, Рисунок 1.8с, таким образом якорь поворачивается, стремясь непрерывно корректировать это искажение и тем самым обеспечивая движущую силу. Двигатель с постоянными магнитами работают по тому же принципу за исключением изменяющейся напряженности магнитного поля.

### Коммутация

Учитывая что движущий момент должен быть плавным и непрерывным, распределение тока в обмотках якоря должно оставаться постоянным. Из этого следует что ток в любой взятой катушке измениться на обратный как только катушка проходит от одного полюса к другому в процессе вращения. Этот процесс смены направления тока известен как коммутация и должен происходить в то время, когда катушка замыкается при помощи щетки между соседними сегментами коллектора. Неспособность якоря обеспечить разворот тока во время короткого замыкания приведет к искрению щетки. Принцип действия коллектора изображено на рисунках 1.9 и 1.10. Существует физический предел скорости с которой ток может быть скоммутирован. Этот предел обычно определяется как произведение мощности на валу двигателя и скорости вращения. Часто принимаемый предел примерно равен 3х10^6(kW\*min^-1). В случае необходимости больших значений возможна установка нескольких якорей на одном валу или несколько последовательно расположенных двигателей(при условии распределения суммарного момента).

### Вращение

Рисунок 1.9а показывает что катушка А скоро замкнется накоротко и несет половину тока якоря(I/2) слева на право, где ток I протекает к щетке. Рисунок 1.9б изображает катушку А в середине цикла замыкания, где ток якоря от щетки не проходит через катушку А. На рисунке 1.9 катушка А показана сразу после КЗ несущего I/2 тока справа на лево. Ток в катушке А был перенаправлен или коммутирован.

В случае отказа тока проходить через ноль и устанавливаться на ту е величину с обратным знаком за этот короткий промежуток времени коммутации приводит к искрам на щетках так как включается индуктивный контур катушки якоря.

Изменения тока показаны в графической форме на рисунке 1.10. Ток на катушке А равен I/2 слева на право пока сегмент с соединен со щеткой(Рисунок 1.9). Как область контакта с сегментом с увеличивается, ток протекающий от щетки через сегмент с к катушке А уменьшается. Если ток через сегменты Ь и с пропорционален к площади контакта щеток, то ток через катушку А линейно уменьшается до нуля (слева направо), а затем растет линейно в противоположном направлении, Рисунок 1.10. При таких условиях коммутация будет линейной и безыскровой, при помощи изменяющегося сопротивления угольной щетки / медного сегмента контакта. Из-за индуктивности катушки якоря, реактивный ток появляющийся в подключенной катушке, задерживает ток в короткозамкнутой катушке, как показано на рисунке 1.10.

При увеличении нагрузки двигателя происходит увеличение тока якоря и потока якоря, искажая поток, генерируемый полем. Это искажение, которое производит крутящий момент, ухудшает коммутацию и создает искрение на щетках. Степень искажения потока от нейтральной оси потока пропорциональна току якоря. Эффект называется реакцией якоря. Ссылаясь на рисунок 1.8, щетки показаны на нейтральной оси, то есть под углом 90 ° по отношению к потоку, и на полпути между полюсами поля, неискажённом потоке. Рисунок 1.8c показывает, что искажение потока вследствие реакции якоря вызывает сдвиг нейтральной оси. Если ось щетки были перемещены в положение X-Y, рис 1.8c, щетки снова расположены на нейтральной оси, то есть под углом 90 ° по отношению к направлению основного пути потока.

### Компенсация

Для улучшения коммутации, вводятся добавочных полюса смещения основного потока таким образом, что он лежит на геометрически нейтральной оси. Эти полюса установлены между основными полевыми полюсами и их катушки проводят полный ток якоря, генерируя поток пропорциональный току (моменту нагрузки) и уменьшения влияния реакции якоря.

Отсюда следует, что добавочные полюса наиболее эффективны для коррекции, когда поток поля находится на максимальном уровне. Широко используемый метод ослабления поля постепенно снижает свой самокорректирующийся эффект; следовательно, качество коммутации может быть затронуто, когда двигатель работает при слабых полевых условиях что иногда требуется в применении системы.

Дополнительный способ уменьшения этой нежелательной реакции якоря, чтобы нейтрализовать поток якоря непосредственно под основными полюсами с использованием компенсационной обмотки. Эти обмотки размещены в пазах, вырезанных у воздушного зазора полюсных наконечниках и проводящие полный ток якоря, соединены последовательно с якорной цепью, таким образом, давая компенсацию с текущей нагрузкой. Компенсирующие обмотки на полюсных наконечниках показывает проблемы как механической безопасности, так и электрической изоляции, подходящее решение которых часто вязано со значительными дополнительными расходами. Использование компенсированной машины ограниченно отсюда вытекают режимы эксплуатации с очень широким диапазон работы в полевых условиях, таких как применение высокоскоростных машин и других связанных с быстро меняющимися нагрузками и скоростями, в которых производительность коммутации компенсированного двигателя может быть более выгодна, если сравнивать с некомпенсированной машиной.

## Коммутация машины постоянного тока с постоянными магнитами

Коллектор также играет очень важную роль в функционировании D.C. PM. Для уменьшения пульсации вращающего момента на валу двигателя желательно поддерживать магнитное взаимодействие между ротором и статором равномерно распределенным, насколько это возможно. В этом случае, однако, дополнительные пары полюсов и компенсационные обмотки не применяют.

Главная задача коллектора - переключение тока для каждого набора обмоток на якоре, а если оптимальное соотношение между потоком статора и потоком якоря будет поддерживаться для лучшего преобразования в крутящий момент, более высокие скорости коммутации имеют важное значение для обеспечения минимальной пульсации крутящего момента в двигателе. Это означает, что чем выше число сегментов включены в проект, тем ниже пульсации крутящего момент. Тем не менее, на практике это ограничивается практичность, стоимостью и свободным пространством. Поэтому хорошая коммутация в двигателе D.C. PM является компромиссом.

## Конструкция DC двигателя

Основные компоненты D C. двигателя включают вращающийся установленный на валу обмотанный якорь и подключенный коллектор, система возбуждения якоря через воздушный зазор, несущих и ограждающих и рам с подшипниками вала и щетки для подключения к коллектору. Эти компоненты и другие можно посмотреть в разборе типичной машины, рисунок 1.11.

## Рама DC двигателя

Основной каркас типичного современного четырехполюсного DC двигателя представляет собой квадрат, шихтованную стальную раму с изогнутой внутренней поверхностью. Главные полюса и катушка возбуждения установленный на внутренней поверхности в 90 друг от друга, а дополнительные полюса - 45 между.

Двигатели с квадратной рамой предлагают меньшую высоту центра по сравнению с круглым каркасами двигателей в силу того, что основные полюса, установлены на четырех плоских внутренних гранях конструкции и что четыре дополнительных поля установлены на диагональных осях, закрепленных на внутренних углах квадрата.

## Якорь DC двигателя

Якорь состоит из цилиндрического шихтованного стального сердечника, установленного на валу, с серией пазов для размещения обмоток катушек якоря, изолированы друг от друга и сердечника. Концы катушек соединены с изолированными сегментами коллектора.

Коллектор, сегментированная цилиндрическая медная конструкция, смонтирована на одном конце сердечника якоря, с клиновидной сегмента баров зажат между концевыми кольцами коллектора, изолированы друг от друга и металла якоря. Эти сегменты обрабатываются на внешней осевой поверхности, чтобы обеспечить гладкую концентрическую поверхность, на которой щетки могут быть в контакте. Узел якоря показан на рисунке 1.12.

Слоты обмотки якоря искажены примерно на один шаг для уменьшения пульсации вращающего момента при низкой скорости и генерации шума на высокой скорости. Такой эффект обжатие накладываемый на вращения вала двигателя будет неприемлемо во многих приложениях. Например, привод оси станка с такой характеристикой вполне может оставить нежелательный узор на заготовке.

Точный метод перекоса сталкивает изготовителя двигателя с двумя проблемами. Во-первых, в определении размера перекоса для конкретной конструкции двигателя. Во-вторых, что гораздо труднее изогнуть якорь для машины автоматической намотки, когда слои искажены. Система автоматизированного проектирования играет большую роль в решении первой из этих трудностей, и большинство производителей двигателей разработали стандартные программы для ускорения магнитных расчетов. Современные намоточные машины делают относительно легкой работу намотки катушек в перекошенные слоты якоря.

Концы катушки якорной обмотки связана с стекловолокном и эпоксидной смолы для высокой скорости работы (> 6000 мин-1 для многих применений станков) для предотвращения отклонения обмотки якоря под действием центробежных сил. Два балансировочных диска, по одному для каждого подшипника, обеспечивают динамическую балансировку R или более точный стандарт S в диапазоне рабочей скорости машины.

## Щетки

Количество щеток рассчитано на ток при полной нагрузке цепи якоря и рабочей скорости дорожки коллектора и условия работы в целом регулируют количество используемого углерода. Давление щетки обычно фиксировано и неизменны по допустимой длине износа, и управляется с помощью натяжения пружин. Это очень важно использовать правильный тип щетки!

## Монтаж

Типичный D.C. двигатель показанный на рисунке 1.11 является каплезащищенный (1P23) заключен электродвигателе на лапах с клеммной коробкой бокового монтажа и с тахогенератора обратной связи, соединенной с неприводной стороной. Доступ к щеточной шестерне осуществляется через четыре смотровые крышки вокруг торцевого щита коллектора, хотя на практике могут быть использованы только три. Любой из этих трех контрольных отверстий могут быть использованы для монтажа принудительной вентиляции, чтобы позволить широкий (как правило, 100: 1) операции диапазон скоростей при постоянной нагрузке крутящим моментом.

Простая интеграция квадратной рамы машины также позволяет соединительной коробке быть установленной на любой из трех доступных граней машины, и сама машина может быть установлена как на лапки, так и на грань; и так как оба конца шилда имеют монтажные кронштейны, они могут быть легко повернуты на 90 °, чтобы закрепить их на боку лапки.

## Дизайн DCPM

Промышленный двигатель с постоянными магнитами (PM DC) как правило имеют меньший размер рамы для данной мощности, чем их двухобмоточные аналоги, хотя длины рам могут быть больше.

Серводвигатель с постоянными магнитами является традиционным в большинстве конструкции, но, как правило, включает в себя технические усовершенствования, чтобы получить рабочие характеристики более высокого порядка, чем у классического двигателя D.C. PM. Области, где конструктор двигателя достигает требуемой точности включают инерцию ротора и выбор материалов магнитов.

## Инерция ротора

Одним из ключевых элементов двигателя является ротор или конструкция якоря. Это нормальное требование системы автоматического регулирования, чтобы иметь возможность быстрого ускорения и замедления двигателя (и нагрузки). Для облегчения изменений в скорости, и для того, чтобы уменьшить входную мощность, необходимую для достижения этих изменений, инерция ротора сведена к минимуму.

Поскольку инерция увеличивается пропорционально квадрату диаметра, ротор PM серводвигателя, как правило, длиннее по отношению к их диаметру. Следует соблюдать осторожность, чтобы не применять серводвигатели с очень низкой инерцией с нагрузкой имеющей высокую степень инерции, как несоответствие инерций может привести к очень проблемным резонансам.

Главным критерием выбора системы сервопривода, в отличие от системы обычного D.C. двигателя переменной скорости является возможность работы двигателя на очень близкой к нулевой скорости, в то же время предлагая номинальный крутящий момент.

## Материалы постоянных магнитов

Выбор магнитного материала для двигателя PM D.C. является основным решающим фактором в эксплуатационной характеристике. Обычные двигатели D.C. PM используют недорогой ферритовый магнитный материал, который, хотя и более чем достаточен для большинства применений, имеет некоторые врожденные недостатки.

Механически, ферритовые магниты являются хрупкими, и поэтому, как правило, связаны с корпусом двигателя, который является безопасным. Однако, поскольку ферритовые магниты также хрупкие, они чувствительны к механическим ударам и могут ломаться, если обращаться с двигателем с неосторожностью.

Одним из наиболее существенных недостатков недорогих магнитов, однако, является легкость, с которой они могут быть размагничены. Ферритовые магниты имеют относительно низкий уровень размагничивания. В нормальных условиях, так и с корректно настроенной системой управления, размагничивание двигателя не возможно. Тем не менее, если система не настроена правильно, можно частично размагнитить двигатель при перегрузках по току в якоре или с температурой более точки Кюри материала, в результате сниженного вращающего момента и, как правило, выше, чем номинальная скорость двигателя при легкой нагрузке, для заданного входного напряжения.

Альтернативные виды магнитного материала позволяют преодолеть эти проблемы с очень высокими уровнями размагничивания и диапазонами рабочих температур. Такой материал самарий-кобальт, который относится к категории редкоземельным магнитных материалов. Существует много разработок в этой области и постоянно появляются новые, усовершенствованные, материалы.

В настоящее время, магниты, изготовленные из редкоземельных материалов являются дорогостоящими, и их использование может удвоить стоимость двигателя, но для многих применений, выбор таких магнитных материалов является неоспоримо оправданым; результирующий магнитный поток намного более плотный на единицу объема магнита, и, следовательно, инерция ротора может быть значительно снижена при заданном номинальном выходном крутящем моменте. Это позволяет улучшить производственные показатели ускорения / замедления за единицу тока якоря.

Магнитный материал с ценой обыкновенного ферритового магнита и преимуществами редкоземельных типов был найден. Теперь это было достигнуто с появлением синтетических магнитных материалов, главным образом, неодима, железа и бора, который полностью приемлем для многих отраслей промышленности, в том числе в автомобильной промышленности, и обеспечивает исключительно высокие эксплуатационные характеристики без большой цены как для редкоземельного материала.

Сам магнит выполнен из порошков, взятых из постоянно растущего разнообразия магнитных материалов и формуют требуемый размер, форму и профиля с использованием высокой температурный специализированный процесс спекания.

Поставленный изготовителю двигателя в ненамагниченном состоянии, магнит сначала запрессовывается в раму двигателя с использованием двух частей адгезива с соответствующей высокой температурой плавления. Процесс сборки продолжается намагничеванием путем вставки близко расположенного металлический проводник через станины двигателя и введения сильноточный ударного импульса через узел путем разряда батареи конденсаторов через проводник. Импульс тока поляризует элементы спеченных магнитов и насыщает их к одному краю их характеристики намагничивания.

# Асинхронный электродвигатель переменного тока(АЭД)

## Обзор

Короткозамкнутый асинхронный двигатель является простой, универсальной рабочей лошадкой в промышленности, перерабатывая около 70 до 80 процентов всей электроэнергии в механическую. Этот тип двигателя, тем не менее демонстрирует некоторые весьма непривлекательные рабочие характеристики, несмотря на интенсивное развитие, в частности неустойчивую и нелинейную характеристику тока в зависимости от нагрузки. Он неизменно предназначен для работы с фиксированной скоростью, большие производительности, имеющие такие функции, как глубокопазный ротор, чтобы ограничить пусковые токи при выполнении прямого пуска от сети . Технология электронной регулировки скорости преобразователя способна обеспечить необходимое переменное напряжения / ток, частоту питания которое требует трехфазная машина требует для эффективного, динамичного и стабильного управления скоростью.

Современная технология электронного управления способна не только сделать асинхронный двигатель переменного тока применимым для многих приложений, использующих современных приводов, но и значительно расширить его применение и использование преимуществ, таких как низкие капитальные и эксплуатационные расходы.

Более поразительно до сих пор, микроэлектронные разработки сделали возможным высокую динамику работы асинхронных двигателей путем применения векторного управления. Практический эффект том, что теперь стало возможным управлять асинхронным двигателем переменного напряжения таким образом, чтобы получить динамические характеристики во всех отношениях лучше, чем можно было бы получить с помощью комбинаций с фазно- контролируемым двигателем постоянного тока. Различные виды управления асинхронного двигателя полностью описаны в главе 4.

## Основные уравнения и построение

### Электрические характеристика асинхронных двигателей

Рассмотрим обмотки статора простого трехфазного двухполюсного асинхронного двигателя, каждая фаза обмотки, имеющие только один слот на полюс на фазу, как показано на рисунке 1.13. Конец соединения для катушек не показаны, но R и R1 отмечают начало и конец красной обмотки фазы и аналогично для Y и B проводов. Катушки расположены в 120 друг от друга.

Если предположить, что, когда ток статора положителен он течет внутрь проводников R, Y и B, и, следовательно, наружу в RI. Y1 и В1, что ток в фазе R на рисунке 1.13а находится на своем максимальном положительном значении, и что в фазе обмотки Y и В токи в тот же момент являются отрицательными, и каждая из которых равна половине максимального значения, то эти токи создают магнитное потоки, представленные линиями со стрелками на рисунке 1.13а, а оси потока в горизонтальном положении.

Тридцатью градусами позже в цикле питания, токи в фазах R и В равны 0,866() своему максимому, и ноль в фазе Y. Картина потока этого тока показана на рисунке 1.13b. Следует отметить, что ось этого потока в настоящее время на одной линии с катушкой Y-YI и, следовательно, повернут по часовой стрелке на 30 ° от приведенной на рис 1.13а.

После того, как пройдет еще 30 ° в цикле питания ток в обмотке фазы В достигнет максимального отрицательного значения, а токи в R и Y положительны, при половине их максимального значения. Эти токи создают магнитный поток, показанный на рисунке 1.13c, оси потока сместились по часовой стрелке еще на 30 ° по сравнению с рис.1.1b.

Таким образом, за каждый интервал времени, соответствующий 30 ° в цикле питания, ось потока статоре поворачивается на 30 ° в пространстве. С помощью двухполюсного статора (одна пара полюсов) поток поворачивается на один оборот в пространстве в одном цикле питания. Магнитный поток называется вращаться с синхронной скоростью и скорость вращения потока равна:

где, f = частота питания в герцах, и p = число пар полюсов. (двухполюсный двигатель имеет одну пару)

Более наглядно выразить скорость в поворотах в минуту

ЭДС создаваемое в проводнике ротора трансформаторным эффектом имеет максимальное значение в области максимальной плотности потока. При вращении потока, например по часовой стрелке, направление ЭДС генерируемых в стационарных проводниках ротора (определяется правилом правой руки Флеминга) обозначенны обычными крестиками и точками на рис 1.14a.

ЭДС генерируемое в одном проводнике ротора, показанного на рисунке 1.14b производит ток, эффектом от которого является усиление плотности потока на левой стороне проводника и ослабить его на правой стороне. Вследствие этого, прикладываемая на ротор сила, стремящейся переместить его в направлении вращения потока. Чем выше скорость ротора, тем ниже скорость вращающегося потока статора поля по отношению к обмотке ротора, и, следовательно, тем меньше ЭДС генерируемая в обмотке ротора.

Если скорость ротора стало таким же, как вращающегося поля, т.е. синхронной скорости, проводники ротора будут неподвижны по отношению к вращающемуся потоку. Не будет ЭДС и тока ротора и, следовательно, крутящего момента на роторе. Из-за трения и парусности, ротор не сможет продолжать вращаться на синхронной скорости. Таким образом, частота вращения ротора должна опуститься ниже синхронной скорости, и как это произойдет так ЭДС ротора и ток, а следовательно и вращающий момент, будет увеличиваться, пока скорость не совпадает с той которую позволяют потери и нагрузка на валу двигателя.

Разница в скорости ротора по отношению к скорости вращающегося потока статора известен как скольжение. На рисунке 1.15, для заданного крутящего момента ОА, скорости вращения ротора AC и скольжения AD:

Обычно скольжение выражают в процентах от синхронной скорости, то есть AD / AB х 100. Скольжение приблизительно пропорционально крутящему моменту от нуля до полной нагрузки.

Скольжение при полной нагрузке составляет от примерно 7 процентов для небольших двигателей до 2 процентов для больших, и является хорошим показателем эффективности машины; чем ниже скольжение тем выше эффективность. Тот факт, что короткозамкнутый асинхронный двигатель не является ни истинной константой скорости машины, ни по своей природе способна обеспечить работы с переменной скоростью является серьезным ограничением.

Анализ показывает, что сила тока потока ротора поворачивается с той же скоростью, как и и результирующий ток потока статора и что оба являются стационарными по отношению друг к другу. Асинхронный трехфазный двигатель можно рассматривать как трансформатор, имеющий воздушный зазор между магнитопроводами основной (статора) и вторичной (ротора) обмоток. Этот воздушный зазор, хотя и разработан, чтобы быть как можно меньше, оказывает существенное влияние на характеристики в короткозамкнутом роторе переменного тока.

Воздушный зазор требует большего намагничивания и дает большие магнитные потери, чем трансформатор такого же номинала кВА. Тем не менее, статор и ротор должны быть сбалансированны по ампер-виткам, а также же поддержвать намагничивание и потери без нагрузки, так как и в конструкции трансформатора. Таким образом, увеличение в процента скольжения из-за нагрузки сопровождается увеличением тока ротора (вторичный ток) и, следовательно, путем соответствующего увеличения тока статора (первичный ток) выше тока холостого хода. Этот ток холостого хода для типичного двигателя с короткозамкнутым ротором лежит в пределах от 25 до 40 процентов от тока полной нагрузки и в значительной степени из-за магнитного тока возбуждения, требуемого воздушного зазора. Таким образом, асинхронная машина в своем рабочем диапазоне нагрузки является саморегулирующейся для входной мощности, это регулирование контролируется скольжением в процентах от нагрузки.

Самый популярный короткозамкнутый асинхронный двигатель в размерах примерно до 5 кВт имеет конструкцию четырехполюсника. Его синхронная скорость с питанием в 50 Гц:

Расчет скольжения около 5% и типичная заводская скорость 1425мин-1.

## Характеристика момента

Недостатком короткозамкнутой машины является фиксированная характеристика ротора. Пусковой момент непосредственно связан с сопротивлением цепи ротора, так же как скольжение в работе от нагрузки и скорости.

В идеале, относительно высокое сопротивление ротора требуется для хороших пусковых характеристик (момент от тока), а низкое сопротивление ротора для низкого скольжения от скорости при полной нагрузке (и высоком КПД).

Эта проблема может быть использована в полезной степени, при проектировании стержней ротора со специальными сечениями. Рисунок 1.16, отличается от круглой или квадратной формы, так что потери на вихревые токи, которые вызывают эти специальные участки, увеличивают сопротивление при запуске, когда частота потока ротора (скольжение) высока, и уменьшают его при нормальной рабочей скорости, когда частота потока низкая.

В качестве альтернативы, для специальных двигателей с высоким крутящим моментом используются два или даже три концентрических набора стержней ротора. Относительно дорогой в строительстве, но способный к существенному повышению производительности, эта конструкция приводит к увеличению скольжения при полной нагрузке. Поскольку потери машины пропорциональны скольжению, возросшие потери могут потребовать такой высокий крутящий момент машина начинает быть понижено.

Кривые на рисунке 1.17 показывают ориентировочные характеристики двигателя с короткозамкнутым ротором. В общем случае, чем выше пусковой момент, тем больше скольжения при полной нагрузке. Это является одним из важных параметров конструкции с короткозамкнутым ротором, так как она связана с эффективностью работы и, следовательно, рабочими потерями.

## Отношение напряжение-частота

Почти все коммерчески доступные промышленные асинхронные электродвигатели намотаны для прямого подключения и работают от напряжения питания и частоты, которые превалируют в стране, где они будут использоваться. Это относительно простой вопрос для производителя двигателя, чтобы выбрать число витков на катушке и размер провода, чтобы соответствовать любому напряжению в широком диапазоне. Если требуется подключить двигатель с постоянной скоростью работающий от прямого включения в линию в двигатель с переменной скоростью с использованием инвертора необходимо учитывать влияние частоты на поток и крутящий момент.

Асинхронный двигатель на обычном питании работает с вращающимся полем, создаваемым трехфазных током в обмотках статора. Величина поля контролируется в широком смысле напряжением протекающим через обмотки. Это происходит потому, что сопротивление обмотки дает лишь небольшое падение напряжения, даже при токе полной нагрузки, и, следовательно, в стационарном состоянии напряжение питания должно быть сбалансировано ЭДС индуцированным вращающимся полем. Это ЭДС зависит от произведения трех факторов:

1 Суммарный поток на поле (который обычно определяется конструктором машины).

2 Общее число витков на фазу обмотки статора.

3 Скорость вращения поля или частота.

Точно такие же параметры справедливы для конструкции трансформатора, за исключением того, что поле пульсирует вместо поворота.

В трансформаторе это можно объяснить тем, что ЭДС индуцированные в обмотке определяется по формуле:

где V – ЭДС индуциоравонная в катушке, K – константа, фи – поток через катушку и f – частота питающего напряжения.

Она может быть преобразована:

Для постоянного потока, можно увидеть, что отношение V/f должно оставаться постоянным.

Скорость вращения поля, для которого установлено максимальное напряжение, известна как базовая скорость.

## Повышенное напряжение

Если, опять же в стационарном состоянии, напряжение, приложенное к зажимам статора увеличивается без соответствующего увеличения частоты, только поток может изменяться, чтобы восстановить равновесие между приложенным напряжением и ЭДС. Если поток вынужден увеличиться путем применения чрезмерного напряжения, железный сердечник машины постепенно приходит в насыщение. Это не только увеличивает потери железа вследствие гистерезиса и вихревых токов, но может привести к очень существенному увеличению тока статора, с соответствующими резиситивными потерями. Так как большинство машин предназначены для работы с минимумом материала, их магнитные цепи изначально очень близки к насыщению и чрезмерного напряжения статора стоит тщательно избегать.

## Уменьшение частоты

Последствия снижения частоты питания легко можно вывести из соотношения, описанного выше. Для того же потока индуцированная ЭДС в обмотке статора будет пропорционально частоте, следовательно, напряжение, подаваемое к катушке должно быть соответственно уменьшено, чтобы избежать чрезмерного насыщения сердечника. Это справедливо для изменения частоты в широком диапазоне. Таким образом, зависимость частота-напряжение должна быть линейной, если поток должен поддерживаться постоянным в пределах машины, как задумано проектировщиком. Если поток является постоянным, так же как и крутящий момент двигателя при заданном токе статора, следовательно, привод имеет постоянную характеристику крутящего момента.

Несмотря на то, что постоянный контроль напряжение-частота (V/f) является важным основополагающим принципом, уместно отметить, отклонения от него, которые являются существенными, если должен быть покрыт широкий диапазон скоростей. Во-первых, операция превышения базовой скорости легко достигается за счет увеличения выходной частоты инвертора по сравнению с нормальным сетевым напряжением; две или три базовых скорости легко получить. Выходное напряжение инвертора не может обычно быть выше, чем его входное напряжение и, следовательно, типичная характеристика V/F показана на рисунке I.I8а. Так как V постоянна больше базовой скорости, поток будет падать как частота увеличивается после того, как достигается предел выходного напряжения. Поток машины падает (рис 1.18b) в прямом отношении к фактическому V/F. Несмотря на то, что значительно снижает потери в сердечнике, способность машины производить крутящий момент ухудшается и требуется меньше механической нагрузки, чтобы получить ток полной нагрузки от инвертора. Привод называется имеющий постоянную характеристику мощности выше базовой скорости. Многие приложения не требуют полного крутящего момента на высоких скоростях могут использовать этот расширенный диапазон скоростей.

Второе рабочее состояние, при котором отклонение от постоянной V/F выгодно при очень низких скоростях, в результате чего падение напряжения, возникающего от сопротивления статора становится значительно больше. Это падение напряжения за счет потока, как показано на Рисунок 1.18b, чтобы поддерживать действительно постоянного поток внутри машины напряжение на зажимах должно быть увеличено выше постоянного значения V/F, чтобы компенсировать эффект сопротивления статора. На самом деле, когда выходная частота приближается к нулю, оптимальное напряжение равно падению IR на статоре. Компенсация сопротивления статора обычно называется форсировкой напряжения и почти все инверторы предлагают некоторую форму регулировки таким образом, что степень увеличения напряжения может быть согласована с фактическим сопротивлением обмотки. Нормально, что форсировка постепенно снижается к нулю по мере того, как частота возвращается к базовому значению. На рисунке 1.18с изображена типичная схема конусообразного форсирования. Важно заметить что уровень повышения напряжения должен возрасти если требуется высокий стартовый момент, так как падение IR будет больше в силу увеличенного тока статора. В виду этого, автоматический контроль форсирования в зависимости от нагрузки полезен для достижения желаемых низкоскоростных характеристик. Такая стратегия называется постоянный V/f контроль и является характерной чертой большинства коммерчески доступных AC двигателей., хотя более продвинутые стратегии с открытым контуром становятся доступными.

Описанные до сих пор методы базировались на поддержании постоянного потока в воздушном зазоре или если это не возможно максимизоровать поток. Постоянный поток – идеальное состояние, если требуется максимальный возможный момент, потому что нагрузка не может быть с уверенностью спрогнозированно или если наиболее возможно быстрое тремя ускорения хочется.